

物質を手にすることによる化学結合の学習

The study of chemical bonds with handling of materials

遠藤 忠利

Tadatoshi ENDO

1. はじめに

物質は、単体、化合物、混合物、気体、液体、固体などに関わらず原子間、分子間には結合（相互作用）があり、それによって各物質の物性が決まってくる。したがって、物質を扱う仕事をする場合には結合に関する基本的な知識が必要になる。以前、歯学部1年生の化学演習の「結晶と化学結合」¹⁾の授業の中で「酢酸ナトリウムにはどのような結合があるか」という設問に「金属結合」と答えた学生がいた。ナトリウムは周期表1族（アルカリ金属）に属することを学んだことを適当に解釈した結果の誤答と思える。また、このような誤答を生む背景として、教科書のみで学習で、実際に物質を見たことが無い、触ったことも無いということも上げられる。酢酸ナトリウムはどのような光沢があるのか、何色か、水に溶けるのか、電気が流れるのかなどの印象に残る経験がないことで答えられなかったと推測される。さらに、金属の性質など普段の生活の中で扱っている物質との関連ができていないことも原因と考えられる。そこで、これらのことを改善するために、化学演習の中で物質を手にする教育を行なったことを報告する。

2. 基本的な原子間の結合²⁾

原子間の結合は、共有結合、イオン結合、金属結合、配位結合を考えれば基本的には問題はない。ただし、必ずどれかに分類される訳ではなく、化合物では、共有結合性とイオン結合性を併せ持つ場合など、二つの結合の中間の場合も多い。

① 共有結合

電子対が2つの原子に共有されることにより形成される化学結合である。たとえば、水素原子は1s軌道に電子が1個入っているが、水素分子では、それらの軌道からできた分子軌道（結合性軌道）に2個の電子が入り、水素原子でいる場合より安定化する。2個の陽子間と2個の電子間それぞれのクーロン力による反発より、陽子と電子の引力の方が大きいので結合が可能になる。

実際、水素原子2個の大きさ（体積）より、水素分子の方が小さい。

② イオン結合

正負の電荷を持つイオン間の静電引力による化学結合。金属元素の原子と非金属元素の原子で電子の授受が行なわれ、金属陽イオンと非金属陰イオンとなり、イオン結合を作ることが多い。一般に電気陰性度の差が大きな原子間ではイオン結合が作られやすい。

③ 金属結合

単体が固体の状態では展性、延性に富み、金属光沢を持ち電気と熱をよく伝えるものが金属である。そのような金属元素が集合して金属結晶を作る場合の化学結合が金属結合である。典型的な金属結合は、価電子の一部が金属結晶内を自由に運動する自由電子となり、一様な密度の自由電子の中を金属陽イオンが並んでいる状態で、電子と陽イオン間に働く静電的引力に基づく。

④ 配位結合

共有結合の一種で、一方の原子の非共有電子対が相手の原子と共有されることによって作られる結合である。1個の電子を相手に与えた上で共有結合の形を取るため、イオン結合の性格を帯びる。

3. 基本的な分子間の結合²⁾

原子間の結合と分子間の結合を分けておくことで気体、液体、固体（結晶）、純物質、混合物中での結合が明確になる。

① 水素結合

窒素、酸素、フッ素などの電気陰性度の大きい元素がそれに結合している水素の介在により、他の分子（場合によっては同一分子内）の電気陰性度の大きい原子に近づき安定化することによる結合である。水素結合（ \cdots ）を $X-H\cdots Y$ と表すとき、Xは電気陰性度が大きいので、Hが少し正に帯電し、Yが少し負に帯電することによる静電引力が水素結合である。また、 $X^-\cdots H-Y^+$ との共鳴による安定化の寄与も含まれる。水素は電気陰性度の大きい原子に固定化されておらず交換が常に

起こっている。

② 疎水結合

水中のタンパク質等では、アルキル基やアリール基といった疎水性基が水との接触がなるべく小さくなるように並ぶ。このような疎水性基間の水中における連結を疎水結合という。疎水性基間の自発的作用ではなく、水の凝集力のため、疎水性基が排除されることで、安定化している。

③ ファンデルワールス結合

電氣的に中性な分子間に働く力で、かなり遠距離まで引力が働く。異なる分子に属する荷電粒子(電子、核)間の静電力によって分子の電子分布が一時的に非対称になり電気双極子が誘起されることによる。

④ 極性基の作用による結合

電気双極子モーメントを持つ分子(極性分子)の配向による静電引力作用による。この力は温度が上がると弱くなる。また、双極子モーメントを持つ分子が持たない分子に近づくと、双極子モーメントを持たない分子が誘起分極し、引力を生じる。

4. 結合と物性(気体、液体、固体(結晶))

以上のように結合について分類、説明を行なったが、実際に手にできるものは、分子、原子の集合体である物質である。結合がその物質の物性にどのように反映されているかを示さなくては学習に用いることはできない。

① 気体

原子間の結合より分子間の結合(相互作用)が物性に反映される。同温、同圧で同体積の気体には同数の分子が存在することより、相対的な質量を測定すれば、分子自身の相対的な質量がわかるので、沸点との関係から、ファンデルワールス結合のみの分子、極性基の作用を持つ分子、水素結合がある分子を比較することができる。

② 液体

常温で溶液以外の液体物質は、ほとんどが有機化合物である。沸点により、ファンデルワールス結合が主となる物質と、極性基の作用による結合が主となる物質の比較が行なえるが有害物質が多く教育に用いるのは限られる。有機化合物以外では、臭素(共有結合、ファンデルワールス結合)、水銀、セシウム、ガリウム(金属結合)の単体が常温で液体、低融点の固体として存在し、ガラス管などに封入すれば教育に用いることができるが、そのものを手にして、電気伝導性を測るなどの測定は限られる。

③ 固体(結晶)

固体、特に結晶はその物質内の化学結合によってその性質が影響されることが多い。したがって、結合を

理解するには良い材料である。結合と結晶は混同されることがあるが区別して考える。結晶を大まかに分類し、典型的な性質を次に示す。

a. 共有結合の結晶

すべての原子が共有結合によって結合している結晶。ダイヤモンド、炭化ケイ素などで、硬く、沸点、融点が高く、電気伝導性は低い。

b. 分子結晶

分子間に働く引力による結晶。原子間の結合は共有結合をしている場合が多い。ヨウ素、ドライアイスおよび多くの有機化合物などで、分子間の凝集力が弱いので、柔らかく、融点も低く、電気伝導性は無い。

c. 金属結晶

金属結合による結晶。性質は金属結合の説明で述べた。特殊な例を除けば、金属元素の単体である。金属結晶は同じ大きさの原子が並ぶことから、体心立方格子、面心立方格子、六方最密格子をとる。これらの格子の違いによる物性は密度などに影響するが、原子自身の質量の影響の方が大きい。

d. イオン結晶

陽イオンと陰イオンによるイオン結合による結晶。イオンには、炭酸イオン、アンモニウムイオン、酢酸イオンなどの原子団の場合も多く、この場合は、イオン結合、共有結合、配位結合などが含まれることになる。結晶を作るとき、一般に、イオンの大きさは陰イオン部分が大きく、陽イオン部分が小さいので、陰イオンが面心立方格子、六方最密格子をとり、その隙間に陽イオンが入る。正負のイオンが並ぶことによりその性質は、硬く、もろく、融点が高く、水溶液の場合は電解質である。

5. 物質を手にする学習

それぞれの結合を体験的に学習するために2011年度の化学演習で、固体20サンプルに記号を付けて、どの物質かを同定させる演習を行なった。ここではいくつ当たるかではなく、そのような判断をした理由、判断できない場合はどのような操作をしたら判断できるかをレポートとして求めた。各サンプルは、金属は板状、結晶物質は鉱物標本などを用いた。以下に用いた物質と判断(推定)基準、結晶と結合の種類、その物質固有の性質など学習に含める内容を示す。

a. 水晶(SiO_2)。独特な尖った六角柱の形、透明な結晶より推定。共有結合の結晶(共有結合)。「硬い」という感覚を伝えるためにハンマーでたたき割るという操作を以前学生に行なわせたこともある(安全眼鏡を使用)。

b. ケイ素(Si)。軽く金属光沢で半導体の基板の色より推定。共有結合の結晶(共有結合)。金属のような光沢

を持つことはその物質の金属性を示すものであるから、半導体という概念の学習に用いることができる。

c. ダイヤモンド (C)。輝きのある立方体より推定。他の物質とこすり合わせて硬いことから確認できる。共有結合の結晶 (共有結合)。カッティングされたもの以外目にする機会は少ないので、そのような知識で同定することは難しい。

d. グラファイト (C)。黒色、鱗片状にはがれやすいことから推定。柔らかいこと (紙に線を引ける)、電気伝導性が有ることから確認できる。共有結合の結晶 (共有結合、ファンデルワールス結合)。一層状の共有結合と層間のファンデルワールス結合による結晶なので共有結合による結晶としては例外にあたることを説明した。ダイヤモンド、グラファイト以外の炭素の同素体 (フラーレン、ナノチューブ) も入手可能で利用できる。

e. 氷砂糖 ($C_{12}H_{22}O_{11}$)。表面が粉を吹いているように見えることより、摩擦に対して柔らかい物質と推定される。水に溶け、溶液は電気伝導性がないことから推定できる。分子結晶 (共有結合、極性基の作用による結合)。

f. ポリエチレンテレフタレート。透明、しなやかさより合成樹脂であろうと推定。合成高分子は純物質ではない。共有結合。このような混合物、結晶でない物質もサンプルに加えることで、原子間の結合と分子間の結合を区別する学習に利用できる。また、一部を薬さじ上で燃焼させると灰が残らないことから有機化合物と無機化合物の区別に用いることもできる。

g. 銅 (Cu)。銅色、金属光沢から推定。金属結晶 (金属結合)。

h. 銀 (Ag)。酸化されて銀色ではない箔を用いた。やや紫がかった鍍の色で推定。電気伝導性を調べれば金属であることが確認できる (銀は電気伝導性が最もよい金属)。金属結晶 (金属結合)。鍍の色も金属の個性として学習に用いた。

i. 鉛 (Pb)。鉛色 (鍍色)。重く柔らかい金属より推定。金属結晶 (金属結合)。

j. 金 (Au)。金色、重さ (少量なので感じられないことも有り) により推定。金属結晶 (金属結合)。

k. 白金 (Pt)。銀色、重さ (少量なので感じられないことも有り) で推定。金属結晶 (金属結合)。

l. アルミニウム (Al)。銀白色、軽さより推定。白金とは光沢の鈍さ (表面が酸化皮膜で覆われている) で区別できる。酸、塩基共に反応すること (両性元素) で確認できる。金属結晶 (金属結合)。g.~l. は生活の中でよく見かける金属である。共通することは金属光沢 (酸化皮膜で覆われることも有るが)、重さ、などが典型的な金属であるので金属結晶 (結合) という感覚を学生につかませ、さらに、個別の物性を調べるのにより試料である。

m. 硫酸銅 (II)・五水和物 ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$)。青い含水銅 (II) イオンの色、ガラス光沢より推定。イオン結晶 (イオン結合、配位結合)。無水硫酸銅 (II) では、灰色粉末になり、色の違いから配位結合を学習させることができる。再結晶により大きい結晶を作成しておいた。

n. 方解石 ($CaCO_3$)。透明ガラス光沢、マッチ箱をつぶしたような形、複屈折より推定。イオン結晶 (イオン結合、共有結合)。このような物質では化学薬品として入手すると粉状の物質になる。したがって、鉱物標本が最もよい学習用物質である。

o. アラレ石 ($CaCO_3$)。双晶によって見かけが六角柱になる。塩酸を加えて発泡すれば確認できる。イオン結晶 (イオン結合、共有結合)。方解石とは多形の関係を学習するために用いた。

p. 岩塩 (NaCl)。立方体をした透明結晶より推定。ホタル石、石膏とは水に溶けることで区別。イオン結晶 (イオン結合)。ハンマーでたたくと強い癖解を持っているので立方体に割れる (方解石も同様にマッチ箱をつぶした形に割れる)。このことからイオンが並んでいるような感覚を伝えることができる。

q. ホタル石 (CaF_2)。ガラス光沢、正八面体より推定。他の似たような物質とは加熱すると光を発することで区別、確認できる。イオン結晶 (イオン結合)。

r. 石膏 ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)。角が取れたマッチ箱をつぶしたような形より推定。イオン結晶 (イオン結合)。m. の硫酸銅 (II)・五水和物を除き m.~r. は無色透明結晶である。硬く、割れやすく感じられるガラス光沢から、イオン結晶の持つ感覚を体感させるために用いた。これらを手にしただけでの分類区別は知識が無いと難しい。

s. 黄鉄鉱 (FeS_2)。黄色みを帯びた金属光沢より推定。イオン結晶 (イオン結合、共有結合)。電気伝導性が有りかなり金属性を帯びる。

t. 磁鉄鉱 (Fe_3O_4)。黒色、正八面体結晶で、磁石にくっつくことで推定。イオン結晶 (イオン結合)。s. および t. は、イオン結合であるが有色元素を含み透明感はない。いわゆる岩石に近い感覚を持つことから、無機物質の化合物つまりイオン結晶 (イオン結合) を感じてもらうために加えた。

これらのサンプルは小さなポリ袋に入れて学生に渡し、色、光沢、硬さ、曲がりやすさ、重さなどを体感してもらって判断させた。岩塩、氷砂糖などは味で判断したいという学生がいたが安全性に問題が有るのでポリ袋から出さないように指導した。

6. まとめ

この授業では、学生は今までの個々の知識と経験を用い、さらにグループで話し合っ

てサンプルの同定を行っていた。一つ一つを決めていくと最後に知識と合わない物質が残る。そこでまた考えるという繰り返

しで答えを導いていた。また、学生の解答の中には、同定した理由を「見ため」「感じ」と書くこともあったが、そのような場合はどのような「見ため」なのか、どのような「感じ」なのかを書くように指導した。文章としてその物質の特徴を書くことにより、それぞれの結晶、結合の特徴を理解、確認することができる。いろいろな物質を見たことが無い学生、結合という概念で物質を見てこなかった学生に化学の授業を行うときの助けになると考えられる。多くの物質サンプルを集めて、実験、体験を含め授業の中に取り組むことは多くの教育効果が得られると考えられる。³⁾ なお、ここで用いた鉱物サンプルは筆者がミネラルショップ等で購入した個人所有物である。化学薬品と異なり、一点ごとに個性があり、集めるのに時間を要する。

7. おわりに

ここで、演習で用いたいくつかのサンプルの写真を示す。写真なのではっきりしないが、学生が前述のどの物質かを判断した過程を体感できる。



ア) 黄鉄鉱、イ) 方解石、ウ) 水晶、エ) アラレ石、オ) ホタル石、カ) 鉛、キ) ダイヤモンド、ク) 氷砂糖、ケ) 磁鉄鉱

引用文献

- 1) 遠藤忠利、「化学演習」、開成出版 (2012年)
- 2) 長倉三郎 他編、「理化学事典」、岩波書店 (1998年)
- 3) 日本化学会編、「実験で学ぶ化学の世界1 物質の構造と状態」、丸善 (1996年)

物質を手にすることによる化学結合の学習

The study of chemical bonds with handling of materials

歯学部准教授 遠藤忠利